Climatologie du séchoir: propriétés de l'air humide et outils de mesure ou de calcul

Ateliers-conférences sur le séchage du bois, C.I.F.Q, 17e édition

12 et 13 mai 2011, Hôtel PLAZA, Québec

Yves Fortin

Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Université Laval

UNIVERSITÉ LAVAL

Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Plan de la présentation

- État de la question
- Objectifs de la présentation
- Paramètres de commande de la climatologie du séchoir
- Instruments de mesure des paramètres de commande de la climatologie du séchoir
- Propriétés de l'air humide
- Outils de mesure ou de calcul des propriétés de l'air humide
- Conclusion

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

État de la question

Bien comprendre la climatologie du séchoir est une condition essentielle à la réussite du séchage:

1. Paramètres de commande de la climatologie
2. Propriétés de l'air humide
3. Effet du climat dans le séchoir sur la ventilation et la consommation en énergie
4. Mesure ou calcul des propriétés de l'air humide.

Objectifs de la présentation

1. Description des relations physiques et thermodynamiques décrivant la climatologie du séchoir

2. Rappel des principaux outils de mesure ou de calcul de la climatologie du séchoir.

Paramètres de commande de la climatologie du séchoir

1. La température sèche

2. L'humidité relative de l'air (ou température humide)

3. La vélocité (vitesse) de l'air

Instruments de mesure des paramètres de commande de la climatologie du séchoir

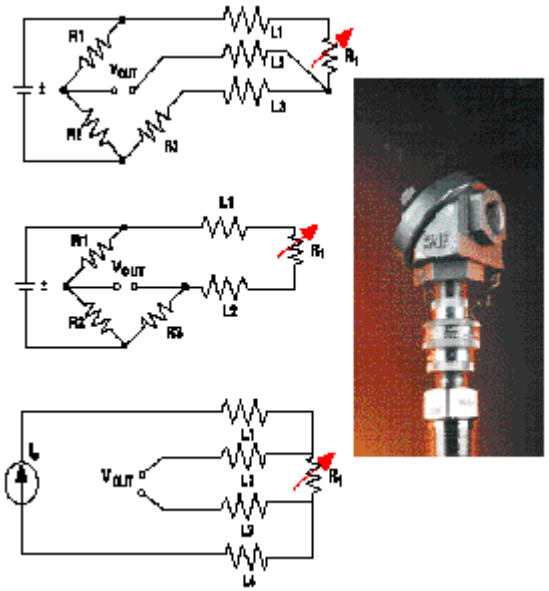
1. La température sèche: RTD, thermocouples, circuits intégrés.

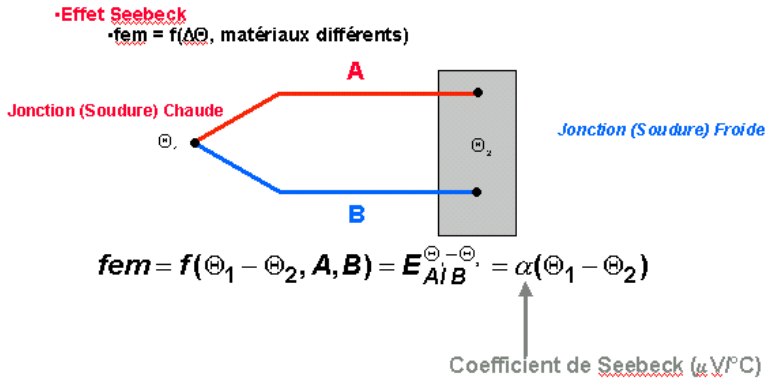
2. L'humidité relative de l'air (ou température humide): psychromètres à thermomètres sec et humide, hygromètres électroniques

3. La vélocité de l'air: anémomètres à fil chaud, anémomètres à hélices, tube de Pitot

Instruments de mesure des paramètres de commande de la climatologie du séchoir

Sondes de température



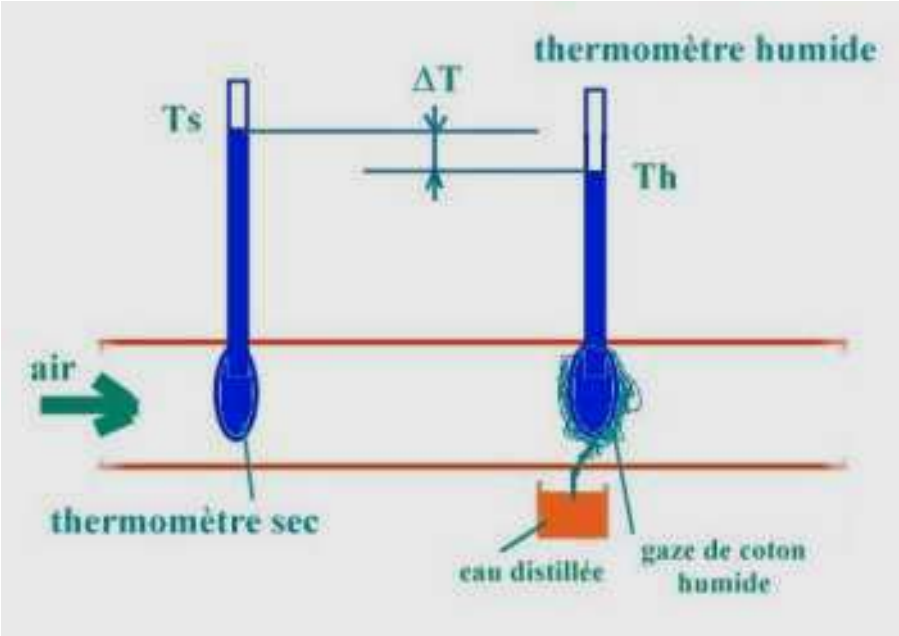

•Effet Seebeck
•fem = f(ΔΘ, matériaux différents)
A
Jonction (Soudure) Chaude
Jonction (Soudure) Froide
B
$fem = f(\Theta_1 - \Theta_2, A, B) = E_{A|B}^{\Theta_1 - \Theta_2} = \alpha(\Theta_1 - \Theta_2)$
Coefficient de Seebeck (µV/°C)

RTD: « resistance temperature detector » avec Pont de Wheatstone (± 0,1°C)
www.sensorsmag.com/.../so-what-is-rtd-1079

Thermocouple passif (effet Seebeck) (± 0,5°C)
www.eaeeie.org/.../menumsensorstypesfr.html

Instruments de mesure des paramètres de commande de la climatologie du séchoir

Psychromètre à thermomètres sec et humide (humidité relative)

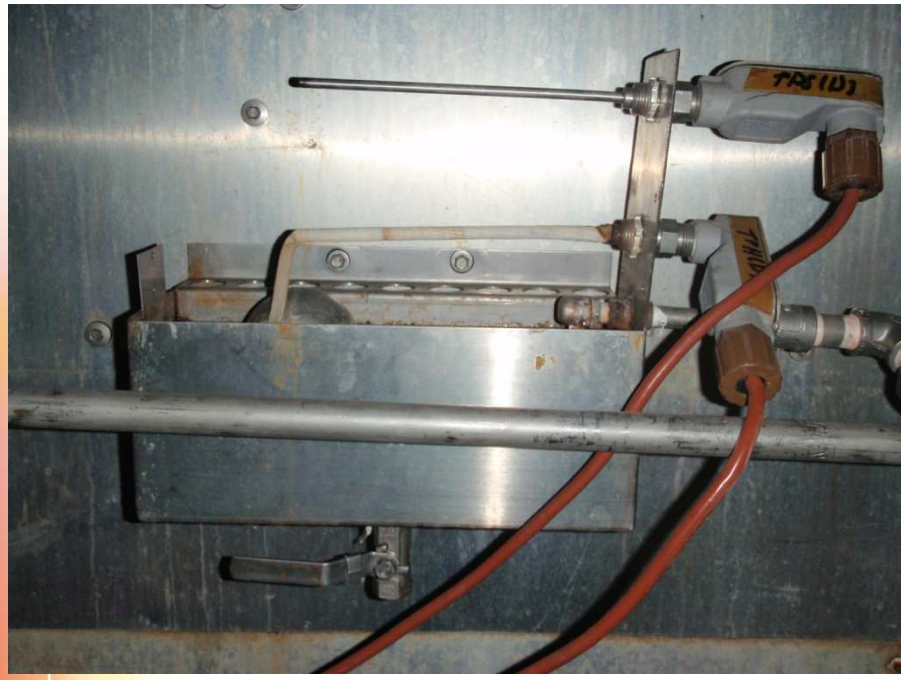


Principe de la mesure

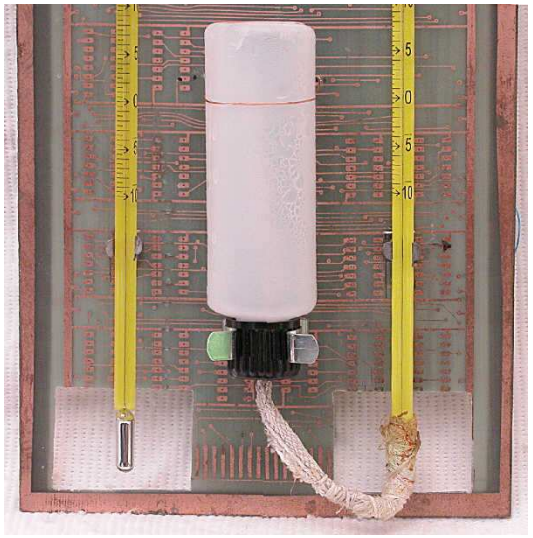
michel.hubin.pagesperso-orange.fr/capteurs/ch...

Instruments de mesure des paramètres de commande de la climatologie du séchoir

Psychromètre à thermomètres sec et humide (humidité relative)



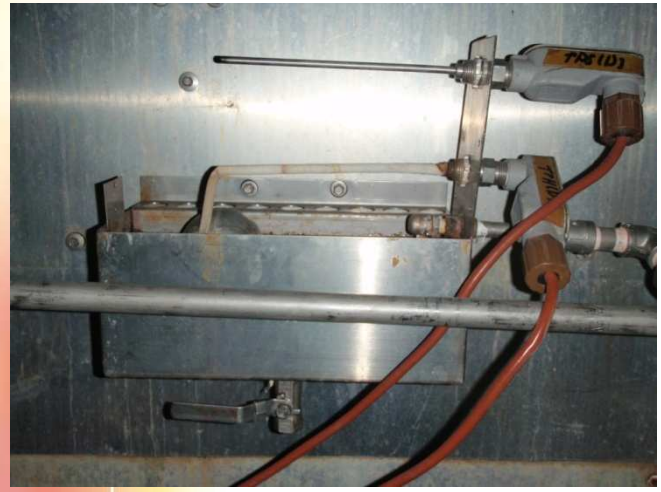
Séchoir expérimental MEC Université Laval
Gaze de coton tubulaire



Psychromètre pour climats doux
techni-meteo.niceboard.com/t4-un-psychrometre...

Propriétés de l'air humide

Sources d'erreur de la mesure de l'humidité relative à l'aide du psychromètre



1. Ventilation trop faible (v_{air} > 1,5 m/s)
2. Sondes de température imprécises
3. Coton contaminé par dépôts calcaires ou ferreux
4. Dessèchement du coton
5. Eau trop froide
6. Manque d'eau dans le réservoir
7. Échange de chaleur par rayonnement des radiateurs ou des murs du séchoir
8. Échange de chaleur par conduction thermique provenant du support de la sonde.

Instruments de mesure des paramètres de commande la climatologie du séchoir

Hygromètre électronique (humidité relative)

www.alibaba.com/product-free/111296669/Temper...

Instruments de mesure des paramètres de commande la climatologie du séchoir

Anémomètre (vitesse de l'air)

À hélice

www.hellopro.fr/Chevrier_Instruments_inc-7931...

À fil chaud

www.chevrierinstruments.com/Francais/Nouveaut...

Propriétés de l'air humide

1. La température sèche - T_s
2. La température humide - T_h
3. Le point de rosée - T_{pr}
4. L'humidité absolue - ω
5. La masse volumique de l'air humide - mv_{ah}
6. La masse volumique de l'air sec - mv_{as}
7. Le volume spécifique de l'air humide (sur une base sèche) - V'_s
8. L'enthalpie de l'air humide (contenu en énergie) - h_{ah}

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Propriétés de l'air humide

Humidité relative

$$HR = \left(\frac{p_V}{p_{VS}} \right)_{T,P} \text{ x } 100 \qquad (\%)$$

p_v = pression partielle de la vapeur d'eau présente dans l'air
p_{vs} = pression de vapeur d'eau saturante
P = pression totale du mélange air-vapeur ($p_a + p_v$)

où $$p_{VS} = 10^{\left(A - \frac{B}{T+C} \right)}$$

$A = 7{,}0625$
$B = 1650{,}27$
$C = 226{,}34$

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Propriétés de l'air humide

Humidité relative

$$HR = \left(\frac{p_V}{p_{VS}} \right)_{T,P} \text{ x } 100 \qquad (\%)$$

Si $T_s \leq 100^oC$, HR ≤ 100% (mélange air-vapeur)

$H_{\text{équilibre du bois}} < 23\%$

Si $T_s > 100^oC$, $T_h < 100^oC$ HR < 100% (mélange air-vapeur surchauffé)
Si $T_s > 100^oC$, $T_h = 100^oC$, HR < 100%, (vapeur surchauffée)

$H_{\text{équilibre du bois}} < 10\%$

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Propriétés de l'air humide

Humidité relative (déduite de T_s et T_h)

$$HR = \left[\frac{p_{VS(Th)} - 0{,}5(T_s - T_h)}{p_{VS(Ts)}} \right] x\ 100 \qquad (\%)$$

où p_{vs} est donnée en mm Hg et T en ^{o}C
(1 mm Hg = 133,322 Pa).

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Propriétés de l'air humide

Humidité absolue

$$\omega = \frac{m_V}{m_{as}} \qquad \left(\frac{kg_v}{kg_{as}} \right)$$

où m_v = masse de vapeur (kg)

m_{as} = masse d'air sec (kg)

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Propriétés de l'air humide

Masse volumique de l'air humide et de l'air sec

$$mv_{ah} = \frac{353}{T} - \frac{1{,}317 p_v}{T} \qquad \left(\frac{kg_{ah}}{m^3_{ah}} \right)$$

où T est en K

$$mv_{as} = \frac{353}{T} \qquad \left(\frac{kg_{as}}{m^3_{as}} \right)$$

N.B. À une température sèche donnée, l'air humide est plus léger que l'air sec

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Propriétés de l'air humide

Énergie contenue dans l'air humide (enthalpie)

$$h_{ah} = 1{,}003T + (2500 + 1{,}92T)\omega \qquad \left(\frac{kJ}{kg_{as}}\right)$$

où h_{ah} = enthalpie unitaire (p/r $T_{réf}$ = 0°C)
T est la température sèche en °C

$$H_{ah} = h_{ah}\, m_{eau} \frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \qquad (kJ)$$

où H_{ah} = enthalpie totale

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Propriétés de l'air humide

Volume d'air humide requis pour évaporer une masse d'eau donnée d'un chargement de bois

$$V_{ah} = \frac{1}{(\omega_2 - \omega_1)} \cdot V'_s \cdot m_{eau} \quad (m^3_{ah})$$

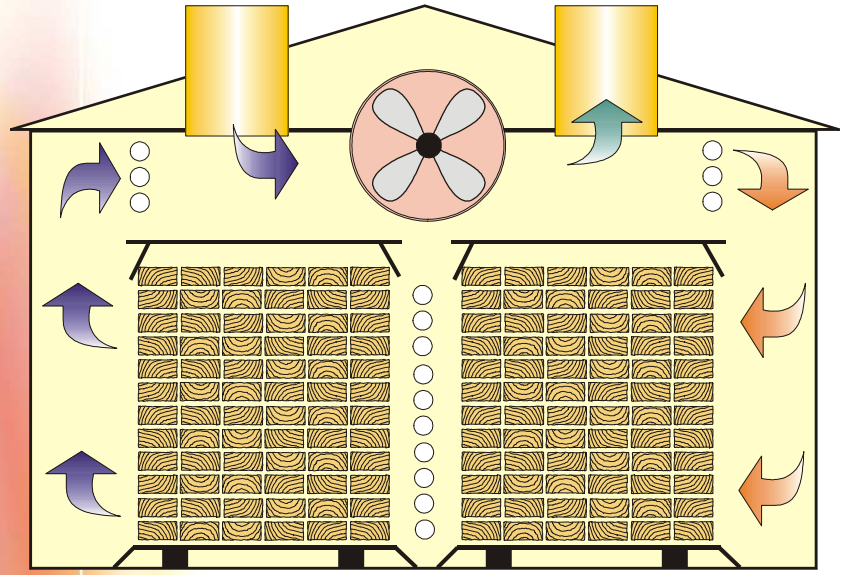
où
- ω_2 = humidité absolue à l'évent de sortie (kg_v/kg_{as})
- ω_1 = humidité absolue à l'évent d'entrée (kg_v/kg_{as})
- V'_s = volume spécifique de l'air humide sur une base sèche (m^3_{ah}/kg_{as})
- m_{eau} = masse d'eau à évaporer (kg_{eau})

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Volume d'air humide minimum requis pour sécher de 90 à 9% 200 000 pmp (472 m^3) de sapin baumier

T_s entrée = 5°C
HR entrée = 90%

T_s sortie = 60°C
HR sortie = 60%



M_{eau} = 128 077 kg
Dimensions réelles des sciages:
51 x 102 mm

V_{ah} entrée = 1 300 400 m^3

V_{ah} sortie = 1 752 500 m^3

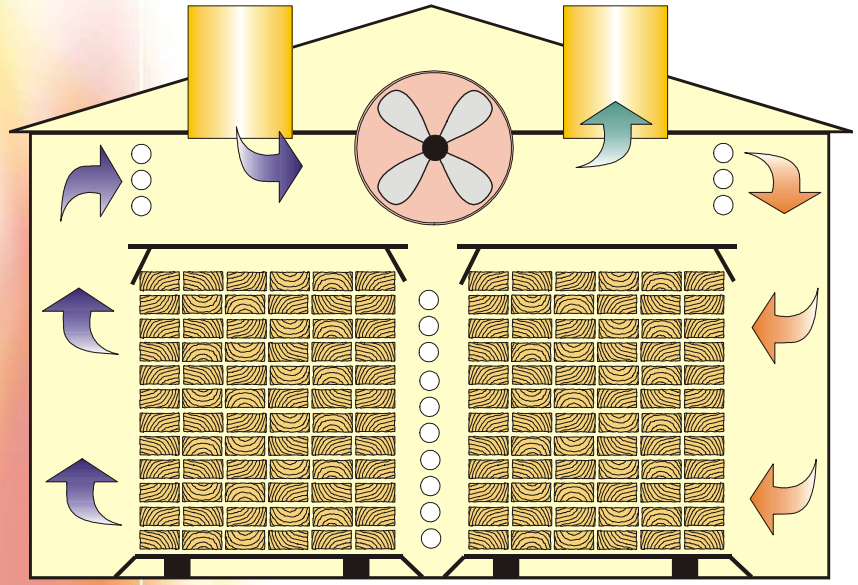
20 évents de 12 po fonctionnant à 100% d'ouverture pendant 115 h

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Volume d'air humide minimum requis pour sécher de 90 à 9% 200 000 pmp (472 m³) de sapin baumier

T_s entrée = 5ºC
HR entrée = 90%

T_s sortie = 90ºC
HR sortie = 70%



V_{ah} entrée = 173 775 m³

V_{ah} sortie = 437 720 m³

20 évents de 12 po fonctionnant à 100% d'ouverture pendant 28,7 h

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Excédent d'air

Définition: pourcentage du volume d'air humide à circuler dans les évents d'aération en sus de la valeur minimale théorique

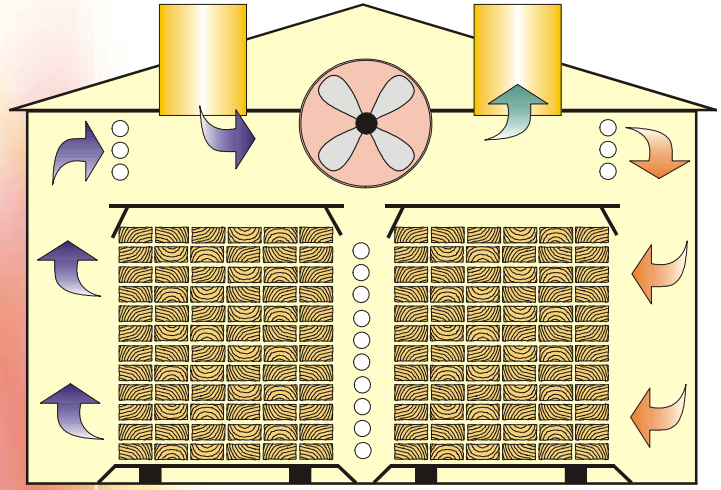
Séchoirs étanches avec un contrôle indépendant des évents d'aération: 10-15%

Séchoirs non étanches sans un contrôle indépendant des évents d'aération: 15-25%

Énergie contenue dans le volume d'air humide minimum requis pour sécher de 90 à 9% 200 000 pmp (472 m^3) de sapin baumier

T_s entrée = 5°C
HR entrée = 90%

T_s sortie = 60°C
HR sortie = 60%



h_{ah} entrée = 17 kJ/kg_{as} (16 Btu/kg_{as})
H_{ah} entrée = 27 630 MJ (26 163 300 BTU)

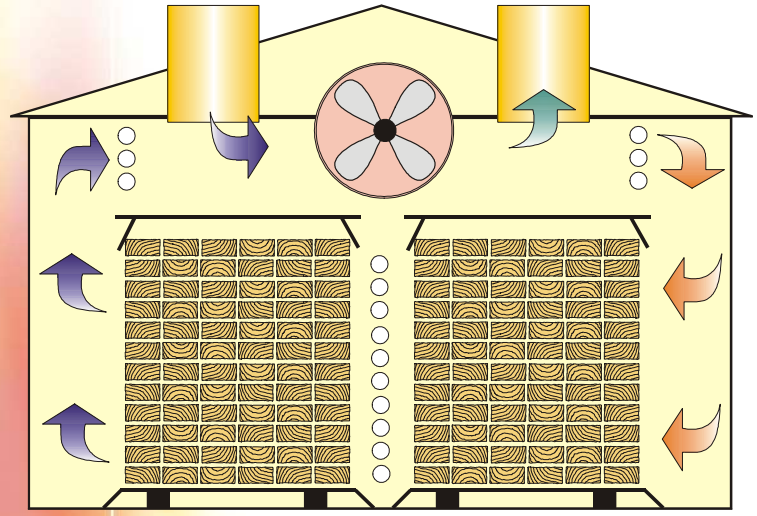
h_{ah} sortie = 277 kJ/kg_{as} (263 Btu/kg_{as})
H_{ah} sortie = 454 000 MJ (429 900 000 BTU)

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Énergie contenue dans le volume d'air humide minimum requis pour sécher de 90 à 9% 200 000 pmp (472 m^3) de sapin baumier

T_s entrée = 5°C
HR entrée = 90%

T_s sortie = 90°C
HR sortie = 70%



h_{ah} entrée = 17 kJ/kg_{as} (16 Btu/kg_{as})
H_{ah} entrée = 3 722 MJ (3 524 000 BTU)

h_{ah} sortie = 1667 kJ/kg_{as} (1579 Btu/kg_{as})
H_{ah} sortie = 364 840 MJ (345 492 000 BTU)

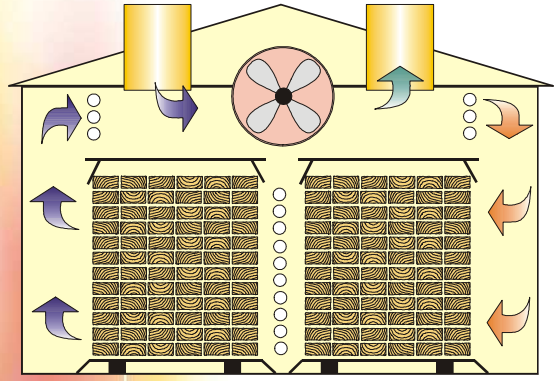
20% inférieure au séchage à 60°C

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Énergie contenue dans le volume d'air humide minimum requis pour sécher de 90 à 9% 200 000 pmp (472 m^3) de sapin baumier

T_s entrée = 5ºC
HR entrée = 90%

T_s sortie = 90ºC
HR sortie = 70%



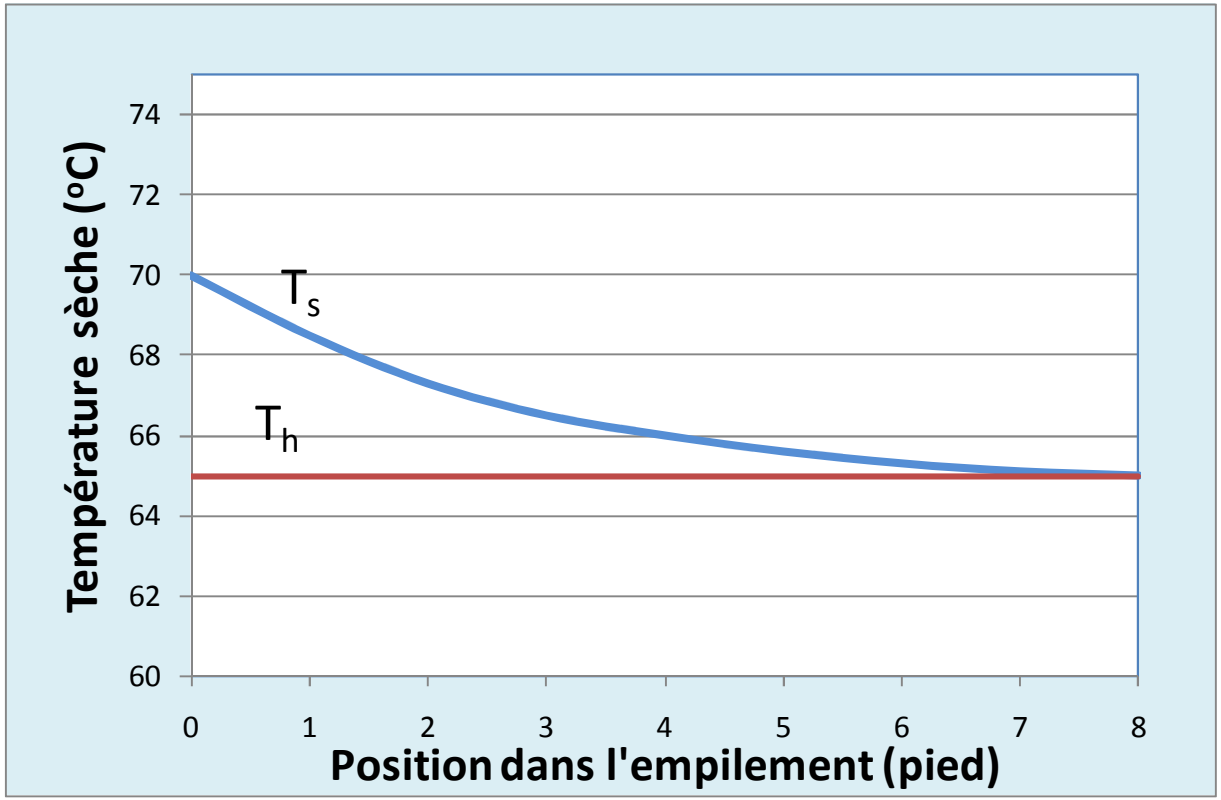
h_{ah} sortie = 1667 kJ/kg_{as} (1579 Btu/kg_{as})
H_{ah} entrée = 364 840 MJ (345 492 000 BTU)

Q_i	kJ	%	kJ	%	kJ/m^3_{app}	kWh/kg_{eau}
	Calorifique + électrique		**Calorifique seulement**			
1	18 436 581	3,7	18 436 581	3,8	38 837	0,04
2	14 314 865	2,8	14 314 865	3,0	30 155	0,03
3	3 489 561	0,7	3 489 561	0,7	7 351	0,01
4	5 205 953	1,0	5 205 953	1,1	10 967	0,01
5	338 652 281	67,2	338 652 281	70,4	713 382	0,73
6	72 641 950	14,4	72 641 950	15,1	153 023	0,16
7	28 633 256	5,7	28 633 256	5,9	60 317	0,06
8	22 389 459	4,4	----			
Total	**503 763 907**	**100,0**	**481 374 448**	**100**	**1 014 031**	**1,04**

Tableur Excel pour le calcul du bilan énergétique au séchoir
Q5 = chaleur pour évaporer l'eau
Q6 = chaleur pour chauffer l'air ambiant et l'humidifier
(Source: CRB, Université Laval)

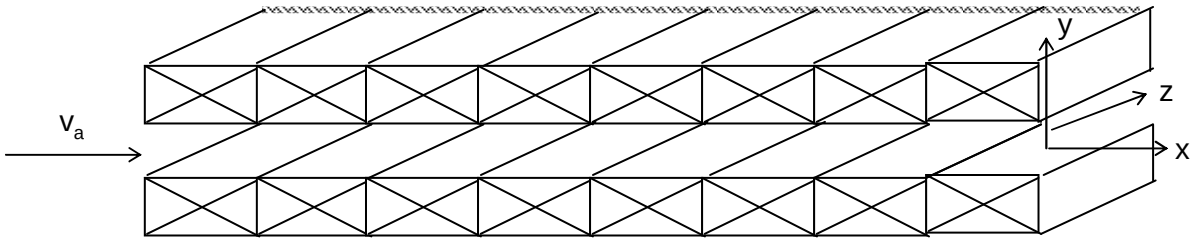
UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Évolution de la température à travers la pile de bois



Évolution de la température à travers la pile de bois

Principe de fonctionnement du DTAB



$$DTAB = \frac{h_{vap} D_b e_{plan} L}{\rho_a v_a c_{pa} e_{bag}} \frac{dH}{dt} \qquad (^oC)$$

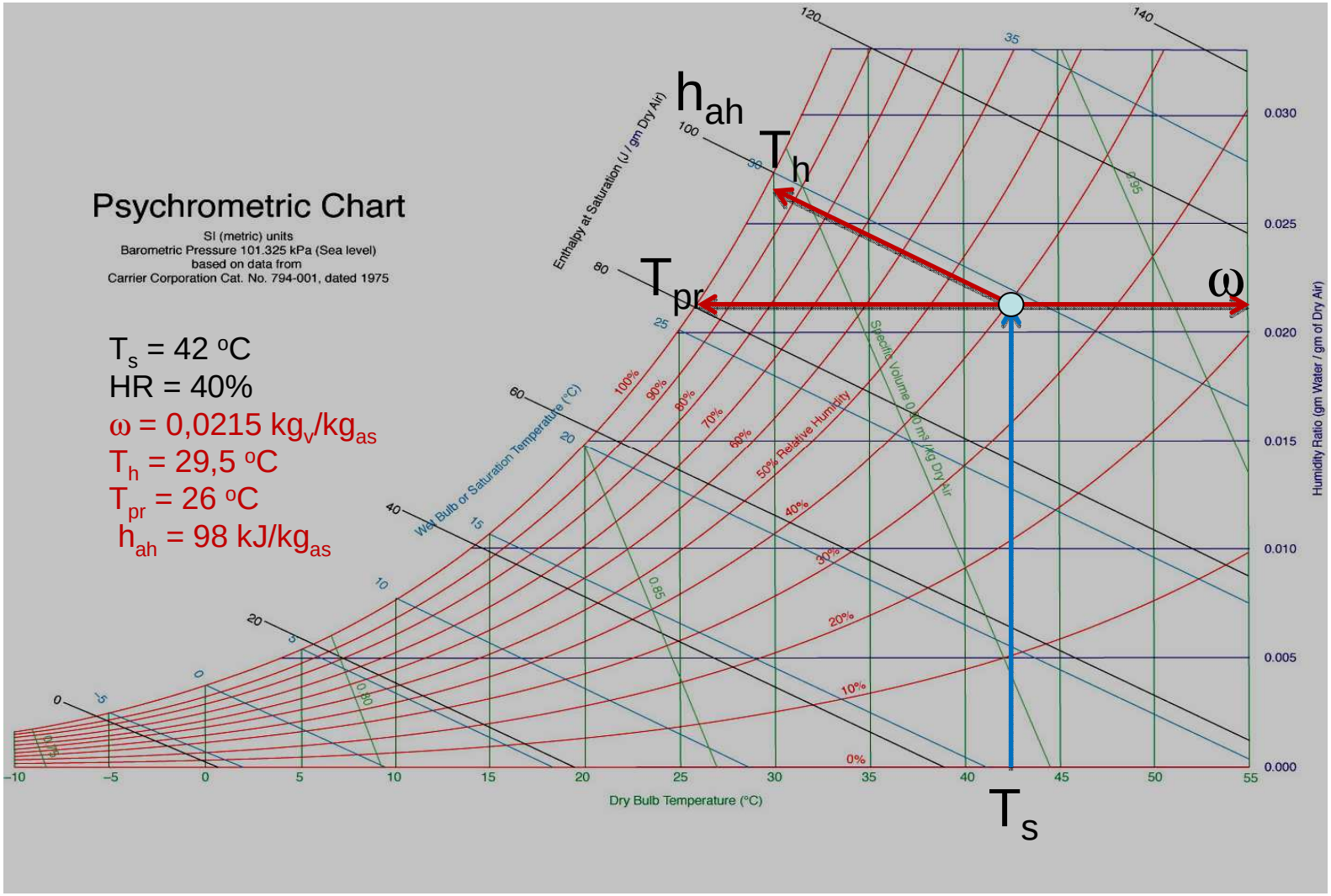
Le DTAB augmente avec l'**épaisseur de la planche**, la **largeur de la pile**, et le **taux de séchage**

Le DTAB diminue avec la **vitesse de l'air** et l'**épaisseur des baguettes**

Outils de calcul des propriétés de l'air humide

Diagramme psychrométrique (faibles températures)

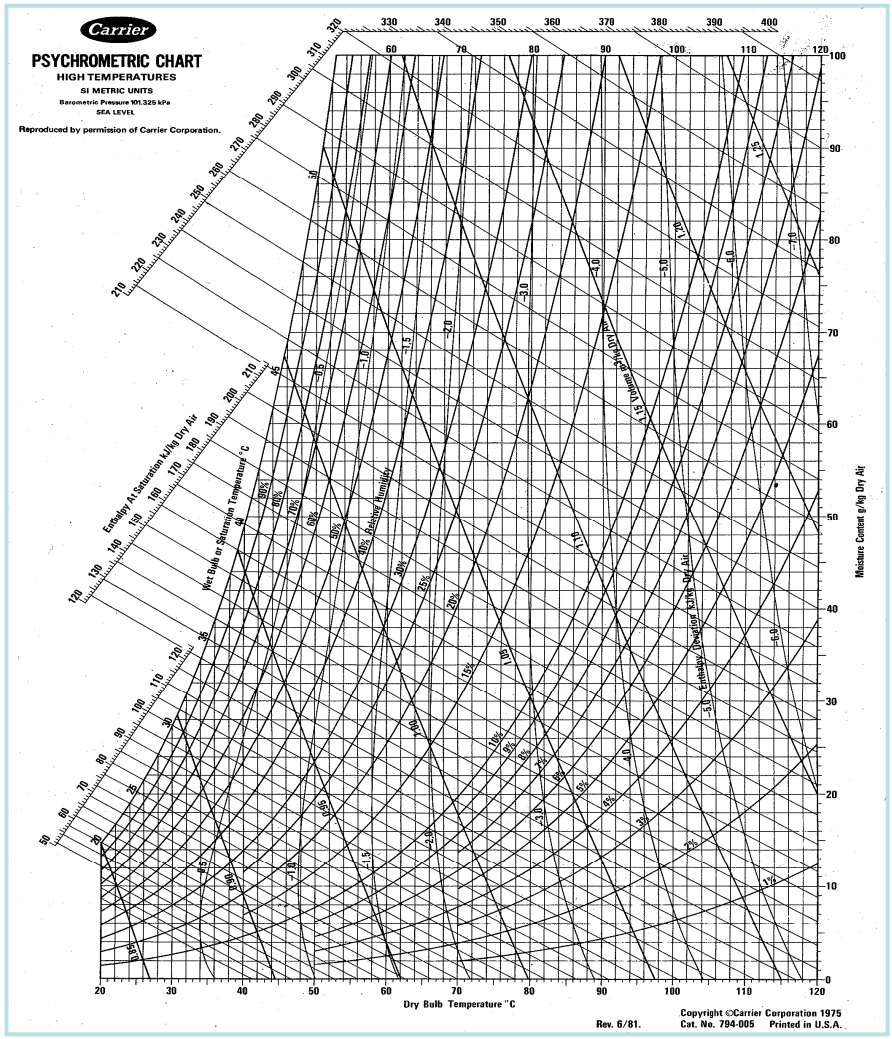
http://fr.academic.ru/dic.nsf/frwiki/65708



Outils de calcul des propriétés de l'air humide

Diagramme psychrométrique (températures élevées)

http://fr.academic.ru/dic.nsf/frwiki/65708



Outils de calcul des propriétés de l'air humide

Table psychrométrique

(Tiré de Cech et Pfaff 1980)

Humidité relative de l'air[1] et équilibre hygroscopique[2] approximatif du bois pour les températures traditionnelles (mélange air-vapeur à la pression atmosphérique)

Thermomètre sec (°F)	Baisse du thermomètre humide (F°)															Thermomètre sec (°C)
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
100	93 *23.3*	89 *20.4*	86 *18.5*	83 *17.1*	80 *15.6*	77 *14.6*	73 *13.4*	70 *12.7*	68 *12.2*	65 *11.4*	62 *10.8*	59 *10.2*	56 *9.6*	54 *9.3*	51 *8.7*	37.8
105	93 *23.1*	90 *20.7*	87 *18.7*	83 *16.7*	80 *15.3*	77 *14.4*	74 *13.5*	72 *12.9*	69 *12.3*	66 *11.5*	63 *10.9*	60 *10.3*	58 *9.8*	56 *9.4*	53 *8.8*	40.6
110	93 *22.8*	90 *20.5*	87 *18.4*	84 *17.0*	81 *15.5*	78 *14.5*	75 *13.6*	72 *12.8*	70 *12.3*	67 *11.6*	64 *10.8*	62 *10.5*	60 *10.1*	57 *9.5*	55 *9.0*	43.3
115	93 *22.5*	90 *20.0*	88 *18.7*	85 *17.3*	82 *15.6*	79 *14.7*	76 *13.7*	73 *12.9*	71 *12.4*	68 *11.7*	66 *11.1*	63 *10.5*	61 *10.1*	59 *9.7*	56 *9.0*	46.1
120	94 *23.4*	91 *20.5*	88 *18.4*	85 *17.0*	82 *15.4*	79 *14.4*	77 *13.8*	74 *12.9*	72 *12.4*	69 *11.8*	66 *10.9*	64 *10.5*	62 *10.1*	60 *9.7*	57 *9.1*	48.9
125	94 *22.9*	91 *20.0*	88 *18.1*	86 *17.2*	83 *15.5*	80 *14.5*	78 *14.0*	75 *13.0*	73 *12.5*	70 *11.8*	68 *11.2*	65 *10.5*	63 *10.2*	61 *9.7*	59 *9.3*	51.7
130	94 *22.5*	91 *19.5*	89 *18.3*	86 *16.9*	83 *15.3*	80 *14.3*	78 *13.8*	76 *13.1*	73 *12.4*	71 *11.8*	68 *11.0*	66 *10.6*	64 *10.1*	62 *9.8*	60 *9.3*	54.4
135	94 *22.1*	92 *20.0*	89 *18.0*	86 *16.5*	84 *15.5*	81 *14.4*	79 *13.8*	77 *13.2*	74 *12.4*	72 *11.9*	69 *11.0*	67 *10.6*	65 *10.2*	63 *9.8*	61 *9.3*	57.2
140	94 *21.8*	92 *19.5*	89 *17.7*	87 *16.7*	84 *15.2*	81 *14.3*	79 *13.6*	77 *13.0*	75 *12.5*	72 *11.7*	70 *11.1*	68 *10.7*	66 *10.2*	64 *9.8*	62 *9.3*	60.0
145	95 *22.3*	92 *19.1*	90 *18.0*	87 *16.4*	85 *15.3*	82 *14.3*	80 *13.7*	78 *13.1*	75 *12.3*	73 *11.8*	71 *11.1*	69 *10.7*	67 *10.2*	65 *9.8*	63 *9.4*	62.8
150	95 *21.9*	92 *18.8*	90 *17.7*	87 *16.0*	85 *15.1*	82 *14.2*	80 *13.5*	78 *12.9*	76 *12.3*	74 *11.8*	72 *11.2*	70 *10.7*	68 *10.2*	66 *9.8*	64 *9.4*	65.6
155	95 *21.5*	93 *19.0*	90 *17.4*	88 *16.3*	85 *14.8*	83 *14.3*	81 *13.6*	79 *13.0*	77 *12.5*	74 *11.6*	72 *11.0*	71 *10.7*	69 *10.2*	67 *9.8*	65 *9.3*	68.3
160	95 *21.2*	93 *18.7*	90 *17.1*	88 *16.0*	86 *15.0*	83 *14.1*	81 *13.4*	79 *12.8*	77 *12.3*	75 *11.7*	73 *11.0*	71 *10.5*	69 *10.1*	67 *9.6*	65 *9.2*	71.1
165	95 *20.3*	93 *18.5*	91 *17.4*	88 *15.7*	86 *14.8*	84 *14.2*	82 *13.5*	80 *12.9*	78 *12.3*	76 *11.7*	74 *11.0*	72 *10.6*	70 *10.1*	68 *9.7*	66 *9.2*	73.9
170	95 *19.5*	93 *18.2*	91 *17.1*	89 *15.9*	86 *14.6*	84 *14.0*	82 *13.3*	80 *12.7*	78 *12.1*	76 *11.4*	74 *10.8*	72 *10.3*	70 *9.8*	69 *9.7*	67 *9.2*	76.7
175	96 *19.9*	94 *18.4*	91 *16.6*	89 *15.5*	87 *14.7*	85 *14.1*	83 *13.4*	81 *12.8*	79 *12.2*	77 *11.5*	75 *10.9*	73 *10.4*	71 *9.9*	70 *9.6*	68 *9.2*	79.4
180	96 *19.3*	94 *18.1*	91 *16.4*	89 *15.1*	87 *14.5*	85 *13.9*	83 *13.2*	81 *12.6*	79 *11.9*	77 *11.3*	75 *10.7*	73 *10.2*	72 *9.9*	70 *9.4*	68 *9.0*	82.2
185	96 *18.9*	94 *17.9*	92 *16.6*	90 *15.3*	87 *14.3*	85 *13.7*	83 *13.0*	82 *12.7*	80 *12.0*	78 *11.3*	76 *10.7*	74 *10.2*	72 *9.7*	71 *9.5*	69 *9.0*	85.0
190	96 *18.5*	94 *17.5*	92 *16.2*	90 *15.0*	88 *14.4*	85 *13.4*	84 *13.0*	82 *12.4*	80 *11.8*	78 *11.1*	76 *10.5*	75 *10.2*	73 *9.7*	71 *9.3*	69 *8.8*	87.8
195	96 *18.3*	94 *17.2*	92 *15.9*	90 *14.8*	88 *14.2*	86 *13.5*	84 *12.8*	82 *12.2*	80 *11.4*	78 *10.8*	77 *10.5*	75 *10.0*	73 *9.5*	72 *9.3*	70 *8.8*	90.6
200	96 *18.0*	94 *16.9*	92 *15.5*	90 *14.6*	88 *14.0*	86 *13.3*	84 *12.6*	82 *12.0*	80 *11.1*	79 *10.8*	77 *10.3*	75 *9.8*	74 *9.5*	72 *9.0*	70 *8.8*	93.3
205	96 *17.6*	94 *16.4*	92 *15.0*	90 *14.4*	88 *13.8*	86 *13.0*	84 *12.4*	83 *12.0*	81 *11.3*	79 *10.6*	77 *10.0*	76 *9.8*	74 *9.3*	72 *8.8*	71 *8.5*	96.1
210	96 *17.2*	94 *16.0*	93 *15.5*	90 *14.3*	88 *13.5*	87 *13.1*	85 *12.5*	83 *11.7*	81 *10.9*	80 *10.6*	78 *10.0*	76 *9.5*	75 *9.3*	73 *8.8*	71 *8.4*	98.9
	1.1	1.7	2.2	2.8	3.3	3.9	4.4	5.0	5.6	6.1	6.7	7.2	7.8	8.3	8.9	
	Baisse du thermomètre humide (C°)															

[1]Les valeurs des humidités relatives sont en caractères romains.
[2]Les valeurs des équilibres hygroscopiques sont en caractères italiques.

Outils de calcul des propriétés de l'air humide

Logiciel en ligne

www.**cactus2000**.de/fr/unit/masshum.shtml

Conclusion

- La climatologie du séchoir est une science complexe fondée sur les lois fondamentales de la physique et de la thermodynamique
- Les propriétés de l'air humide peuvent cependant être facilement évaluées à partir du diagramme ou de la table psychrométrique

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Conclusion (suite)

- La commande des paramètres de contrôle de la climatologie du séchoir repose sur une mesure précise de ces paramètres
- La capacité évaporatrice de l'air augmente de façon exponentielle avec la température
- Le calcul de l'enthalpie minimale théorique de l'air humide à l'évent de sortie correspond à environ 75-80% de toute l'énergie calorifique requise pour le séchage.

Références

- Cech M. et F. Pfaff. 1980. Manuel de l'opérateur de séchoir à bois pour l'est du Canada. Rapport SP504FR, Laboratoire des produits forestiers de l'est, Forintek Canada Corp.

Impossible de réchauffer un corps plus chaud à partir d'un corps plus froid sans un apport de travail

(Effet pervers de la seconde loi de la thermodynamique sur l'entropie!)
Principe de la pompe à chaleur

Merci de votre attention

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique